

IAP12 Rec'd PCT/PTO 08 MAY 2006

PC 10806

Verfahren zur Ermittlung der Rotorlage einer
Synchronmaschine

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung der Rotorlage einer stillstehenden oder sich langsam drehenden Synchronmaschine durch Auswertung von elektrischen Messpulsen, die durch Anlegen von Spannungspulsen an die einzelnen Phasenwicklungen des Stators gewonnen werden, bei dem Änderungen der Induktivität der Phasenwicklungen, die durch die Sättigung des Statoreisens in Abhängigkeit von der Rotorlage verursacht werden, durch Berechnung von Strombetragsdifferenzen von zwei Messpulsen in entgegengerichteten Stromrichtungen ermittelt werden, wobei den Strombetragsdifferenzen Winkelwerte zugeordnet sind, die durch die Anzahl der Phasenwicklungen vorgegeben sind.

Ein derartiges Verfahren ist z. B. aus der US-Patentschrift US 6,172,498 B1 mit dem Titel „Method and Apparatus for Rotor Angle Detection“ bekannt. Bei der Durchführung des bekannten Verfahrens werden an die einzelnen Phasenwicklungen des Stators Messpulse entgegengesetzter Polarität angelegt, aus deren Amplituden Differenzwerte gebildet werden, die zur Bestimmung der allgemeinen Rotorlage und anschließend zur Bestimmung eines Korrekturwertes verwendet werden, mit dem die allgemeine Rotorlage korrigiert wird.

Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass der durch die Messpulse verursachte Restmagnetismus des Statoreisens jeweils den folgenden Messpuls beeinflusst, so dass die

anfängliche Rotorlage nicht ausreichend genau ermittelt wird, so dass die Messgenauigkeit des Verfahrens erheblich beeinträchtigt wird.

Der Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde, die Messgenauigkeit des Verfahrens der eingangs genannten Gattung zu erhöhen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass vor dem ersten Messpuls ein Vormagnetisierungspuls mit einer gegenüber dem ersten Messpuls entgegen gesetzten Polarität und einer dem ersten Messpuls entsprechenden Einschaltdauer erzeugt wird und dass der jeweils erste, an die entsprechende Phasenwicklung angelegte Messpuls als Vormagnetisierungspuls in der gleichen Phasenwicklung wirkt.

Bei einer vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens werden bei der Auswertung der Messpulse den Strombetragsdifferenzen zugeordneten Winkelwerten bestimmte Winkeloffsetwerte hinzuaddiert und die so gebildeten Wertepaare mit einer Referenzkennlinie verglichen, wobei die Summe der Quadrate der Vergleichsergebnisse gebildet und zusammen mit dem zugehörigen Winkeloffsetwert in einem Speicher abgelegt wird, wonach das Minimum der Summe ermittelt wird und der zugehörige Winkeloffsetwert als gemessene Rotorlage ausgegeben wird. Durch diese Maßnahme wird eine weitere Erhöhung der Genauigkeit der ermittelten Rotorlage durch die Auswertung der Referenzkennlinie erreicht, die die Eigenschaften einer Referenzmaschine genau abbildet.

Eine andere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die Winkeloffsetwerte auf einen Winkelbereich begrenzt werden, der durch Vorzeichen der ermittelten Strombetragsdifferenzen bestimmt wird. Durch diese Maßnahme wird eine Erhöhung der Auswertungsgeschwindigkeit bzw. Reduktion der erforderlichen Rechenleistung durch Vorauswahl des zu erwartenden Ergebnisses erreicht.

Um eine Erhöhung der Auswertungsgeschwindigkeit bzw. Reduktion der erforderlichen Rechenleistung durch iterative Verfeinerung der Auflösung der zu ermittelnden Rotorlage zu erreichen sieht die Erfindung vor, dass mehrere Auswertungszyklen nacheinander mit kleiner werdenden Abständen zwischen den Winkeloffsetwerten durchgeführt werden.

Um durch aktiven Stromabbau eine Momentenrückwirkung der Messpulse auf die Rotorlage zu minimieren und die Messzeit zu reduzieren ist nach einem weiteren Erfindungsmerkmal vorgesehen, dass ein oder mehrere Kompensationspulse zur Erhöhung des Stromabfallgradienten des Vormagnetisierungs- sowie der Messpulse erzeugt werden.

Dabei können vorzugsweise zur Erzeugung eines Messpulses zwei oder mehr Phasenwicklungen für eine festgelegte Zeit mit definierten Potentialen verbunden werden oder, insbesondere bei Motoren mit Sternschaltung, eine oder mehrere Phasenwicklungen und der Sternpunkt für eine festgelegte Zeit mit definierten Potentialen verbunden werden. Durch die Gewinnung von weiteren Messpunkten bei zusätzlichen Winkelwerten wird eine wesentliche Verbesserung der Messgenauigkeit erreicht. Ergeben sich durch die zusätzlichen Winkelwerte verschiedene Induktivitäten und Widerstände für die entsprechende Schaltungsanordnung, so muss die Einschaltdauer der

Messpulse angepasst werden und/oder die ermittelten Strombetragsdifferenzen mit einem Skalierungsfaktor multipliziert werden.

Um die Genauigkeit der Rotorlagenermittlung durch optimale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Strommessbereichs zu erhöhen sieht die Erfindung vor, dass die festgelegte Zeit in Abhängigkeit von der für die Erzeugung der Messpulse notwendigen, an die Phasenwicklungen angelegten Spannung gewählt wird. Zusätzlich kann die festgelegte Zeit in Abhängigkeit von der Temperatur der Synchronmaschine gewählt werden. Durch diese Maßnahme wird eine weitere Erhöhung der Genauigkeit der ermittelten Rotorlage durch Kompensation der Widerstandsänderung der Phasenwicklungen unter Temperatureinfluss erreicht.

Sollten keine Spannungs- und/oder Temperaturmessungen möglich sein, so wird eine weitere Erhöhung der Messgenauigkeit durch optimale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Strommessbereichs dadurch erreicht, dass die festgelegte Zeit schrittweise so lange verlängert wird, bis eine gewünschte Stromamplitude des Messpulses erreicht ist.

Bei einer anderen, besonders kostengünstig durchführbaren Variante des Verfahrens nach der Erfindung wird die Stromamplitude aller Messpulse mit einem einzigen Messmittel ermittelt. Durch den Wegfall des Messoffsets bei der Differenzenbildung sowie den Wegfall von Skalierungsfehlern bei der Verwendung mehrerer Sensoren wird die Genauigkeit der Rotorlagenermittlung erhöht. Zur Wahl eines für die Rotorlagenermittlung optimalen Strommessbereichs ist nur ein zusätzlicher Sensor notwendig

Alternativ kann die Stromamplitude aller Messpulse mit einer Strommesseinrichtung ermittelt werden, die der Synchronmaschine zugeordnet ist, so dass keine zusätzlichen Sensoren notwendig sind.

Um die Genauigkeit der ermittelten Rotorlage durch die Berücksichtigung der gemessenen Rotorlagenänderung während der Messung weiter zu erhöhen sieht eine vorteilhafte Weiterbildung des Erfindungsgegenstandes vor, dass die Änderung der Rotorlage aufgrund der Momentenrückwirkung der Messpulse gemessen wird und in Abhängigkeit davon die den Strombetragsdifferenzen zugeordneten Winkelwerte entsprechend korrigiert werden.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht vor, dass die Referenzkennlinie an die ermittelten Strombetragsdifferenzen angepasst wird. Dadurch erfolgt eine Anpassung der Referenzkennlinie an die Eigenschaften der Synchronmaschine zum Ausgleich von Serienstreuungen bei der Fertigung.

Nach einem anderen vorteilhaften Merkmal der Erfindung wird die an die Phasenwicklungen angelegte Spannung während der Messpulse überwacht und bei einer Abweichung von einer vorgegebenen Toleranz der Messpuls wiederholt. Durch diese Maßnahme werden sämtliche, durch Spannungseinbrüche verfälschten Messpulse verworfen.

Bei einer anderen Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, dass während der Einschaltdauer der Messpulse deren Stromamplitude überwacht wird und bei einer Abweichung von einer vorgegebenen Toleranz der Messpuls

wiederholt wird. Durch diese Maßnahme werden sämtliche, außerhalb der Toleranz liegenden Messpulse verworfen.

Schließlich sieht ein weiteres Erfindungsmerkmal vor, dass das Minimum der Summe der Quadrate der Vergleichsergebnisse als Kriterium der Qualität der Ermittlung der Rotorlage verwendet wird. Durch diese Maßnahme werden sämtliche Rotorlagenwerte verworfen, deren zugrundeliegende Strombetragsdifferenzen zu stark von der abgelegten Referenzkennlinie abweichen.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird auf die Zeichnungen Bezug genommen, in denen eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Ermittlung der Rotorlage schematisch veranschaulicht ist. In der Zeichnung zeigen:

Fig. 1 ein Blockschaltbild einer Vorrichtung zur Durchführung des gattungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 2 ein Diagramm der Abhängigkeit $U, I = f(t)$, das Spannungs- und Strompulse einer idealisierten Einzelmessung bei einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens, und

Fig. 3 ein Diagramm, das die Auswertung der Messpulse darstellt.

In der Fig. 1 sind mit dem Bezugszeichen 1 eine Synchronmaschine und mit dem Bezugszeichen 2 eine der Synchronmaschine 1 zugeordnete Ansteuerungselektronik bezeichnet. Die Ansteuerungselektronik 2 enthält im Wesentlichen ein Ansteuerungssoftwaremodul 3 sowie eine Leistungsendstufe 4, deren Ausgangs- bzw. Spannungssignale

U_u , U_v und U_w an die Phasenwicklungen U, V und W der Synchronmaschine 1 angelegt werden. Das Ansteuerungssoftware-modul 3 umfasst ein Steuermodul 5 zum Steuern des Ablaufs der Ermittlung der Rotorlage der Synchronmaschine 1 sowie eine Rotorlageerfassungseinrichtung 6, der die Rotorlageänderung der Synchronmaschine 1 repräsentierende Ausgangssignale $\Delta\varphi$ eines relativen Rotorlagesensors 7 zugeführt werden. Das Steuermodul 5 umfasst ein Messwerterfassungsmodul 8, ein Auswertemodul 9, einen Speicher 10, in dem eine Referenzkennlinie der Synchronmaschine 1 abgelegt ist, sowie eine Schnittstelle 11, deren Ausgangssignal der Rotorlageerfassungseinrichtung 6 zugeführt wird. Das Messwerterfassungsmodul 8 besteht im wesentlichen aus einem Testpulsgenerator 12, einer dem Testpulsgenerator 12 nachgeschalteten PWM-Einheit 13, einer Messeinrichtung 14 sowie einem Messwertspeicher 15.

Im nachfolgenden Text wird die Funktionsweise der in Fig. 1 dargestellten Schaltungsanordnung näher erläutert:

Es wird angenommen, dass die Synchronmaschine 1 sich im Stillstand befindet, wobei zunächst die Messung der Strombetragsdifferenz in der Phasenwicklung U durchgeführt wird. Dabei wird an die Phasenwicklung U ein erstes Potential angelegt, während an die Phasenwicklungen V und W ein zweites Potential angelegt werden. Die Einschaltzeit der so entstehenden Spannung wird vom Testpulsgenerator 12 fest gelegt. Die PWM-Einheit 13 setzt die Anforderungen des Testpulsgenerators 12 um, indem sie die Leistungsendstufe 4 so ansteuert, dass die gewünschten Spannungspulse an die Phasenwicklungen U, V, W der Synchronmaschine 1 angelegt werden. Durch das Anlegen des Spannungspulses U_{Vorm} entsteht in der Phasenwicklung U ein Strompuls I_{Vorm} , (s. Fig. 2), der als Vormagnetisierungspuls dient und eine definierte

Restmagnetisierung bzw. Remanenz im Statoreisen bewirkt. Um den Stromabbau zu beschleunigen wird vom Testpulsgenerator 12 ein Kompensationsspannungspuls $-U_{\text{komp}}$ kürzerer Einschaltzeit t_2 und entgegengesetzter Polarität erzeugt. An den Kompensationspuls $-U_{\text{komp}}$ kann sich eine Wartezeit t_0 anschließen, in der der Strom auf Null abklingt. Als nächstes wird vom Testpulsgenerator 12 ein Spannungspuls $-U_{\text{mess1}}$ mit einer dem vorangegangenen Kompensationspuls $-U_{\text{komp}}$ entsprechenden Polarität erzeugt, dessen Einschaltzeit der Einschaltzeit t_1 des Spannungspulses U_{Vorm} zur Erzeugung des Vormagnetisierungspulses I_{Vorm} entspricht und der einen ersten Strommesspuls I_{mess1} erzeugt, dessen Betragsamplitude am Ende des Spannungspulses $-U_{\text{mess1}}$ in der Messeinrichtung 14 ermittelt wird. Zum Stromabbau wird wieder ein Kompensationsspannungspuls U_{komp} verwendet. Anschließend wird in gleicher Weise ein zweiter Strommesspuls I_{mess2} mit entgegengesetzter Polarität erzeugt, dessen Betragsamplitude ebenfalls von der Messeinrichtung 14 erfasst wird. Aus den ermittelten Betragsamplituden wird in der Messeinrichtung 14 eine Strombetragsdifferenz ΔI_U gebildet, die mit dem zugehörigen Winkelwert im Messwertspeicher 15 abgelegt wird. Der beschriebene Messvorgang wird auch für die Phasenwicklungen V und W wiederholt.

In einem nächsten Schritt werden die aus den Strombetragsdifferenzen ΔI und den zugehörigen Winkelwerten gebildeten Wertepaare dem Auswertemodul 9 zugeführt, in dem sie mit der im Speicher 10 abgelegten Referenzkennlinie verglichen werden. Wie in Fig. 3 dargestellt ist, werden die Wertepaare um einen geeigneten Winkeloffsetwert φ_{Start} derart verschoben, dass die Abweichung zur Referenzkennlinie minimal wird. Zu diesem Zweck wird vorzugsweise die an sich bekannte Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet. Der Winkeloffsetwert φ_{Start} wird

über die Schnittstelle 11 der Motorlageerfassungseinheit 6 übermittelt und von dieser als Startwinkel der Synchronmaschine 1 genutzt. Für den Betrieb der Synchronmaschine 1 wird von der Motorlageerfassung 6 die Rotorlageänderung $\Delta\varphi$ fortlaufend zu dem Startwinkel φ_{Start} hinzuaddiert.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung der Rotorlage einer stillstehenden oder sich langsam drehenden Synchronmaschine durch Auswertung von elektrischen Messpulsen, die durch Anlegen von Spannungspulsen an die einzelnen Phasenwicklungen des Stators gewonnen werden, bei dem Änderungen der Induktivität der Phasenwicklungen, die durch die Sättigung des Statoreisens in Abhängigkeit von der Rotorlage verursacht werden, durch Berechnung von Strombetragsdifferenzen von zwei Messpulsen in entgegen gerichteten Stromrichtungen ermittelt werden, wobei den Strombetragsdifferenzen Winkelwerte zugeordnet sind, die durch die Anzahl der Phasenwicklungen vorgegeben sind, **dadurch gekennzeichnet, dass** vor dem ersten Messpuls I_{mess1} ein Vormagnetisierungspuls I_{vorm} mit einer gegenüber dem ersten Messpuls I_{mess1} entgegen gesetzten Polarität erzeugt wird, wobei die Einschaltzeiten t_1 der zugehörigen Spannungspulse U_{vorm} und $-U_{\text{mess1}}$ gleich sind, und dass der jeweils erste, in der entsprechenden Phasenwicklung (U, V, W) erzeugte Messpuls I_{mess1} als Vormagnetisierungspuls in der gleichen Phasenwicklung (U, V, W) wirkt.
2. Verfahren nach Anspruch 1 **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Auswertung der Messpulse I_{mess} den den Strombetragsdifferenzen ΔI zugeordneten Winkelwerten bestimmte Winkeloffsetwerte hinzuaddiert werden und die so gebildeten Wertepaare mit einer Referenzkennlinie verglichen werden, wobei die Summe der Quadrate der Vergleichsergebnisse gebildet und

zusammen mit dem zugehörigen Winkeloffsetwert in einem Speicher abgelegt wird, wonach das Minimum der Summe ermittelt wird und der zugehörige Winkeloffsetwert φ_{Start} als gemessene Rotorlage ausgegeben wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2 **dadurch gekennzeichnet, dass** die Winkeloffsetwerte auf einen Winkelbereich begrenzt werden, der durch die Auswertung der Vorzeichen der ermittelten Strombetragsdifferenzen bestimmt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3 **dadurch gekennzeichnet, dass** mehrere Auswertungszyklen nacheinander mit kleiner werdenden Abständen zwischen den Winkelwerten durchgeführt werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4 **dadurch gekennzeichnet, dass** ein oder mehrere Kompensationspulse U_{komp} zur Erhöhung des Stromabfallgradienten des Vormagnetisierungspulses I_{Vorm} sowie der Messpulse I_{mess} erzeugt werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Erzeugung eines Messpulses I_{mess} zwei oder mehr Phasenwicklungen für eine festgelegte Zeit t_1 mit definierten Potentialen verbunden werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Erzeugung eines Messpulses I_{mess} bei Motoren mit Sternschaltung eine oder mehrere Phasenwicklungen und der Sternpunkt für eine

festgelegte Zeit t_1 mit definierten Potentialen verbunden werden.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7 **dadurch gekennzeichnet, dass** die festgelegte Zeit t_1 in Abhängigkeit von der für die Erzeugung der Messpulse I_{mess} notwendigen, an die Phasenwicklungen angelegten Spannung U_{mess} gewählt wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8 **dadurch gekennzeichnet, dass** die festgelegte Zeit t_1 in Abhängigkeit von der Temperatur der Synchronmaschine 1 gewählt wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9 **dadurch gekennzeichnet, dass** die festgelegte Zeit t_1 schrittweise so lange verlängert wird, bis eine gewünschte Stromamplitude des Messpulses I_{mess} erreicht ist.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10 **dadurch gekennzeichnet, dass** die Stromamplitude aller Messpulse I_{mess} mit einem einzigen Messmittel ermittelt wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10 **dadurch gekennzeichnet, dass** der Synchronmaschine 1 eine Strommesseinrichtung zugeordnet ist, mit der die Stromamplitude aller Messpulse I_{mess} ermittelt wird.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 12 **dadurch gekennzeichnet, dass** die Änderung der Rotorlage aufgrund der Momentenrückwirkung der Messpulse I_{mess} gemessen wird und in Abhängigkeit davon die den

Strombetragsdifferenzen zugeordneten Winkelwerte entsprechend korrigiert werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 13 **dadurch gekennzeichnet, dass** die Referenzkennlinie an die ermittelten Strombetragsdifferenzen angepasst wird.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14 **dadurch gekennzeichnet, dass** die an die Phasenwicklungen angelegte Spannung während der Einschaltdauer t_1 der Spannungspulse U_{mess} überwacht wird und bei einer Abweichung von einer vorgegebenen Toleranz der Messpuls I_{mess} wiederholt wird.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15 **dadurch gekennzeichnet, dass** während der Einschaltdauer t_1 der Spannungspulse U_{mess} deren Stromamplitude I_{mess} überwacht wird und bei einer Abweichung von einer vorgegebenen Toleranz der Messpuls I_{mess} wiederholt wird.
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 16 **dadurch gekennzeichnet, dass** das Minimum der Summe der Quadrate der Vergleichsergebnisse als Kriterium der Qualität der Ermittlung der Rotorlage verwendet wird.

Zusammenfassung

Verfahren zur Ermittlung der Rotorlage einer Synchronmaschine

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung der Rotorlage einer stillstehenden oder sich langsam drehenden Synchronmaschine durch Auswertung von elektrischen Messpulsen, die durch Anlegen von Spannungspulsen an die einzelnen Phasenwicklungen des Stators gewonnen werden, bei dem Änderungen der Induktivität der Phasenwicklungen, die durch die Sättigung des Statoreisens in Abhängigkeit von der Rotorlage verursacht werden, durch Berechnung von Strombetragsdifferenzen von zwei Messpulsen in entgegengerichteten Stromrichtungen ermittelt werden, wobei den Strombetragsdifferenzen Winkelwerte zugeordnet sind, die durch die Anzahl der Phasenwicklungen vorgegeben sind.

Um die Messgenauigkeit des Verfahrens zu erhöhen sieht die Erfindung vor, dass vor dem ersten Messpuls I_{mess1} ein Vormagnetisierungspuls I_{vorm} mit einer gegenüber dem ersten Messpuls I_{mess1} entgegengesetzten Polarität erzeugt wird, wobei die Einschaltzeiten t_1 der zugehörigen Spannungspulse U_{vorm} und $-U_{\text{mess1}}$ gleich sind, und dass der jeweils erste, in der entsprechenden Phasenwicklung (U, V, W) erzeugte Messpuls I_{mess1} als Vormagnetisierungspuls in der gleichen Phasenwicklung (U, V, W) wirkt.

(Fig. 2)